第 36 卷 第 4 期 中国腐蚀与防护学报 Vol.36 No.4
2016年 8 月 Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection Aug. 2016

SRB作用下X100管线钢在酸性土壤环境中的应力腐蚀开裂行为

罗金恒[1] 胥聪敏[2] 杨东平[2]

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室 西安 710077;
2. 西安石油大学材料科学与工程学院 西安 710065

摘要: 采用慢应变速率拉神 (SSRT) 实验和SEM研究了SRB对X100管线钢在典型的酸性土壤 (鹰潭土壤模拟溶液) 中应力腐蚀开裂行为的影响。结果表明,X100钢母材和焊缝在无菌的鹰潭土壤模拟溶液中的SCC敏感性高于有菌时的,X100钢母材和焊缝在无菌和有菌酸性土壤中的断裂模式均为穿晶SCC断裂,说明SRB的存在抑制了X100钢的脆变,导致X100钢的SCC敏感性降低,这可能是由于SRB能在X100钢表面快速生长繁殖并形成生物膜,该生物膜随时间的增加会不断的堆积并变得致密,一定程度上阻隔了腐蚀性Cl^-进入钢基体表面,致使X100钢的SCC敏感性减小。

关键词: X100管线钢 应力腐蚀开裂 硫酸盐还原菌 酸性土壤

中图分类号: TG172.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537(2016)04-0321-07

Stress Corrosion Cracking of X100 Pipeline Steel in Acid Soil Medium with SRB

LUO Jinheng[1], XU Congmin[2], YANG Dongping[2]

1. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

Abstract: The effect of sulfate reducing bacteria (SRB) on stress corrosion cracking (SCC) behavior of X100 pipeline steel was investigated in artificial solution, which simulated the acid soil medium in the area of Yingtan at the Southeast China by means of slow strain rate test (SSRT) and scanning electron microscope (SEM). The results show that X100 pipeline steel has higher SCC susceptibility in the sterile artificial solution than that with SRB. The failure mode is transgranular cracking in both the two solutions. These results suggest that SRB inhibits the brittleness and reduces the SCC susceptibility of X100 pipeline steel, which may be ascribed to that SRB can breed rapidly and form a compact biofilm on X100 pipeline steel surface, then partly block the migration of corrosive Cl^- onto the X100 steel surface.

Key words: X100 pipeline steel, stress corrosion cracking (SCC), sulfate reducing bacteria (SRB), acid soil

定稿日期: 2015-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51271146),陕西省自然科学基金项目 (2016JQ5068),陕西省重点学科专项资金项目(YS37020203)和陕西省能源化工过程强化重点实验室项目 (SXECPI201503) 资助

作者简介: 罗金恒,男,1972年生,博士,教授级高级工程师

通讯作者: 罗金恒,E-mail: luojh@cnpc.com.cn,研究方向为油气管道及储运设施完整性评价及材料的腐蚀与防护

DOI: 10.11902/1005.4537.2015.177

1 前言

为了满足我国能源需求的不断增长，提高输送效率和降低管道建设成本，采用高压、大管径、高钢级管线钢是油气输送管道发展的必然趋势[1]。X100管线钢作为超前储备用钢，凭借高强度、耐压和低经济成本等优势，必将在我国以后的长输管线建设中大批量使用。而X100管线钢的耐土壤腐蚀性、应力腐蚀开裂敏感性以及疲劳性能等都是应用基础研究应该解决的问题，也是X100管线钢管应用的前提条件[2]。

在天然气与石油加工行业中，输气干线和集气管线的泄漏事故中，有74%是腐蚀造成的，其中管线腐蚀的15%~30%与微生物腐蚀 (MIC) 相关，是目前集输管线的主要腐蚀形态之一[3]。根据大量的样品分析表明，剥离涂层下管线钢的MIC多与硫酸盐还原菌 (SRB) 有关，SRB是引起管线钢土壤腐蚀最主要、最具破坏性的微生物[4-7]。而管道的土壤环境应力腐蚀开裂 (SCC) 是管道发生突发性破裂事故的主要危险之一，在国外许多国家都曾发生过[8]。在所有的腐蚀事故中，点蚀是引起管道内外腐蚀的主要因素，SRB的活动可以极大地改变特定服役条件下金属表面的腐蚀环境特性，致使金属产生严重的点蚀[9]，而SCC裂纹大部分产生于钢铁表面的点蚀坑底部[10,11]。目前，MIC和SCC已成为威胁埋地管线长周期安全运行的两大主要因素。为了了解和证实MIC与SCC在钢铁腐蚀过程中是否存在相关性和协同性，国外一些腐蚀工作者正在进行这方面的研究工作[12-16]，国内在这方面还鲜有报道。而有关X100钢的腐蚀研究，目前国内外主要集中在其抗SCC性能和无菌环境下的耐土壤腐蚀性能方面，因此，开展X100钢在含SRB的实际土壤环境中耐SCC性能研究是十分迫切的，也是工程上非常关注的实际问题。

我国东南部地区经济发达，地下管网密集，红壤是该地区酸性土壤的典型代表，具有土壤致密、含水量高、含氧量低、pH值低 (3~5) 的特点，对材料的腐蚀性极大，管线钢在此环境中具有较高的局部腐蚀敏感性[17]。因此，本文以我国鹰潭土壤的模拟溶液为实验介质，对SRB作用下X100管线钢在酸性土壤环境中的SCC行为进行研究，为X100管线钢在酸性土壤中的工程应用提供数据支持与参考。

2 实验方法

实验所用材料为济钢生产的X100管线钢，其化学成分 (质量分数，%) 为：C 0.04，Si 0.20，Mn 1.50，P 0.011，S 0.003，Mo 0.02，Fe 余量。室温力学性能为：抗拉强度为850 MPa，屈服强度为752 MPa，屈强比为0.89，伸长率为24%。

慢应变速率拉伸实验 (SSRT) 采用光滑板状拉伸试样，试样尺寸参照GB/T 15970制备。母材试样取材方向 (即试样轴向) 沿实际管道的环向，以保证拉伸时试样的主受力方向与实际受力方向一致；焊接接头试样取自直缝焊管，焊缝位于焊接接头试样标距中间。采用SiC水砂纸逐级打磨至1500#。打磨后依次用丙酮除油、去离子水清洗，吹干待用。

选取我国典型酸性土壤—鹰潭土壤环境为模拟研究介质，依据鹰潭土壤的主要理化数据配制的模拟溶液成分 (质量分数，%) 为：0.0084 Cl^-，0.0054 SO_4^{2-}，0.0010 HCO_3^-，pH值为4.36。用分析纯NaCl，$NaSO_4$和$NaHCO_3$及去离子水配制。

实验所用SRB菌种是通过富集培养的方式从土壤中分离出来的。使用修正的Postgate'C培养基对水样中SRB进行富集培养，培养基成分为：0.5 g/L KH_2PO_4，2.0 g/L Mg_2SO_4，0.1 g/L $CaCl_2$，0.5 g/L Na_2SO_4，1.0 g/L NH_4Cl，3.5 g/L 乳酸钠，1.0 g/L 酵母膏。用1 mol/L NaOH溶液调节pH值为 (7.2±0.2)。实验前将培养好的SRB菌种在30 ℃恒温箱中进行活化，然后将50 mL菌液接种到灭菌的950 mL的土壤模拟溶液中。

采用Letry慢应变速率应力腐蚀试验机进行SSRT实验，所有实验采用的应变速率均为1×10^{-6} s^{-1}，实验温度为室温。SSRT实验前1 h先向接菌的鹰潭土壤模拟溶液中通入高纯N_2进行除O_2，防止氧化，整个实验过程中一直缓慢通入N_2。

实验结束后，先用去离子水冲洗试样表面附着的腐蚀产物，然后在超声波清洗仪中使用丙酮溶液清洗断口，以去除表面腐蚀产物，吹干后放入干燥器中密封保存，在JSM-6390A型扫描电子显微镜 (SEM) 下进行断口形貌观察。

试样拉断后采用抗拉强度损失I_σ、断面收缩率损失I_ψ和延伸率损失I_δ评价X100钢在鹰潭土壤模拟溶液中的SCC敏感性，I_σ，I_ψ和I_δ的计算公式如下：

$$I_\sigma=(1-\frac{\sigma}{\sigma_0})\times100\% \quad (1)$$

$$I_\psi=(1-\frac{\psi}{\psi_0})\times100\% \quad (2)$$

$$I_\delta=(1-\frac{\delta}{\delta_0})\times100\% \quad (3)$$

式中，σ和σ_0分别为试样在溶液和空气中的抗拉强度；ψ和ψ_0分别为试样在溶液和空气中的断面收缩率；δ和δ_0分别为试样在溶液和空气中的延伸率。

3 结果与讨论

3.1 SSRT实验结果

X100管线钢母材及焊缝试样在鹰潭土壤模拟溶液及空气中SSRT试样的应力-应变曲线如图1所示，不同介质中的应力腐蚀参数和结果如表1所示。

由图1和表1可见，X100钢焊缝试样在无菌的鹰潭土壤模拟溶液中的应变量、延伸率和断面收缩率均小于其在含SRB的土壤模拟溶液中的。从I_δ，I_ψ和I_σ的变化来看，X100钢的SCC敏感性顺序为：I_δ(含SRB的焊缝试样)＜I_δ(无菌的焊缝试样)＜I_δ(无菌的母材试样)＜I_δ(含SRB的母材试样)，I_ψ(含SRB的焊缝试样)＜I_ψ(含SRB的母材试样)＜I_ψ(无菌的母材试样)＜I_ψ(无菌的焊缝试样)，I_σ(无菌的焊缝试样)＜I_σ(含SRB的焊缝试样)＜I_σ(含SRB的母材试样)＜I_σ(无菌的母材试样)。经过比较可以发现，I_δ，I_ψ和I_σ的变化规律并不完全一致，难以确定介质与SCC敏感性的确切关系，但可以确定的是，X100钢在无菌的鹰潭土壤模拟溶液中SCC敏感性基本上均大于其在含SRB的土壤模拟溶液中的。对比I_δ，I_ψ和I_σ发现，I_δ最大降低了7.46%，I_ψ最大降低了28.89%，I_σ最大降低了4.12%，可知有菌与无菌鹰潭土壤模拟溶液对X100管线钢材料的影响主要是塑性的降低，对于强度影响不明显。X100钢焊缝试样在含SRB土壤模拟溶液中拉伸时I_δ为负数，表明焊缝在含SRB土壤模拟溶液中拉伸时延伸率反而比空气中的大，而且在含SRB的溶液中X100钢焊缝试样的I_δ和I_ψ均远小于母材试样的，说明SRB对于焊缝试样的SCC敏感性影响作用更大。根据以上分析可知，在鹰潭土壤模拟溶液中SRB的存在抑制了X100钢的脆变，致使X100钢的SCC敏感性降低。

3.2 断口及裂纹形貌观察

图2是X100管线钢母材和焊缝在空气中的SSRT断口形貌。由图2可知，X100钢试样在空气中拉伸时，母材和焊缝的宏观断口附近出现了明显的

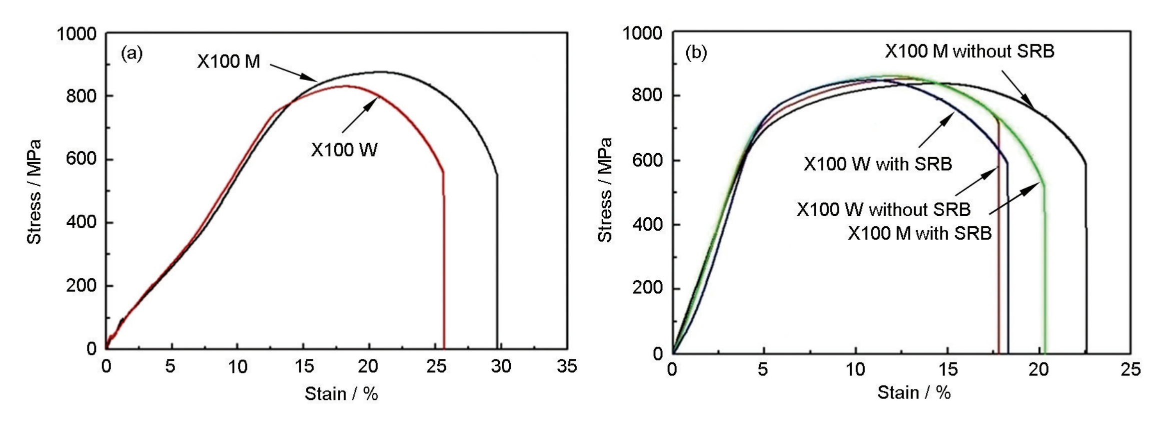


图1 X100管线钢母材和焊缝试样在空气和鹰潭土壤模拟溶液中的应力-应变曲线

Fig.1 SSRT curves of X100 pipeline steel in air (a) and Yingtan soil simulated solution (b) (M: parent metal sample; W: welded metal sample)

表1 X100管线钢在不同介质中的应力腐蚀参数和结果

Table 1 Stress corrosion parameters and results of X100 pipeline steel in different mediums

Sample number	Fracutre life T_F / h	Fracute strength σ_b / MPa	Strain ε / %	Percent elongation δ / %	Percent reduction in area ψ / %	Strength loss coefficient I_σ / %	Percent elongation loss coefficient I_δ / %	Percent reduction loss coefficient I_ψ / %
K-M	85.64	874	29.64	19.00	74.96	---	---	---
K-W	71.51	830	25.63	15.58	62.04	---	---	---
YT-M	63.00	838	22.56	17.92	54.74	4.12	5.70	26.97
YT-W	44.5	852	18.41	15.33	44.83	−2.65	1.60	28.89
YT-M-SRB	56.52	861	20.30	17.58	68.17	1.49	7.46	9.05
YT-W-SRB	44.00	849	18.62	20.83	62.50	1.33	−33.69	0.86

Note: M and W denote parent metal and welded sample, K and YT denote the tests were conducted in air and Yingtan soil, respectively

颈缩现象，且母材的颈缩程度远大于焊缝的，母材断裂面与拉伸轴方向垂直，焊缝断裂面与拉伸轴方向大致成45°角，焊缝的断口较母材平直；母材和焊缝的微观断口形貌均以韧窝为主，且母材的韧窝相比焊缝的要较大且深，同时韧窝间存在着微孔，局部韧窝壁上有明显的蛇形滑移特征，为韧窝-微孔型的韧性断裂，属于典型的韧性断裂特征。以上表明，X100管线钢在空气环境下的SSRT实验伴有塑性形变，当应力大于材料的屈服强度后，材料开始发生塑性形变，在材料内部夹杂物、析出相、晶界和亚晶界等部位发生位错塞积，形成应力集中，进而形成微孔洞，且随着形变增加，显微孔洞相互吞并并变大，最后发生颈缩和断裂[18]。

图3是X100管线钢母材在鹰潭无菌与有菌土壤模拟溶液中的SSRT断口的宏观与微观SEM形貌。从宏观断口可以看出试样断裂面均为斜断口，

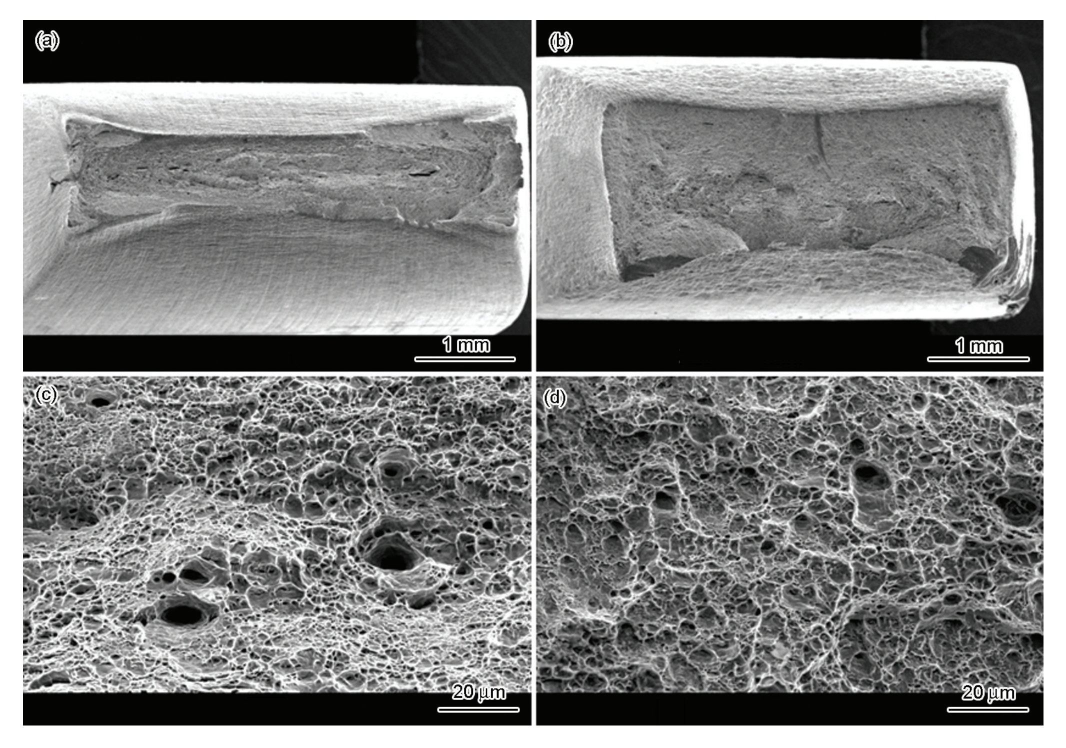


图2 X100管线钢母材和焊缝在空气中的断口形貌

Fig.2 SEM images of fracture surfaces of X100 pipeline steel after SSRT in air: (a) base metal macro-fracture; (b) weld metal macro-fracture; (c) base metal micro-fracture; (d) weld metal micro-fracture

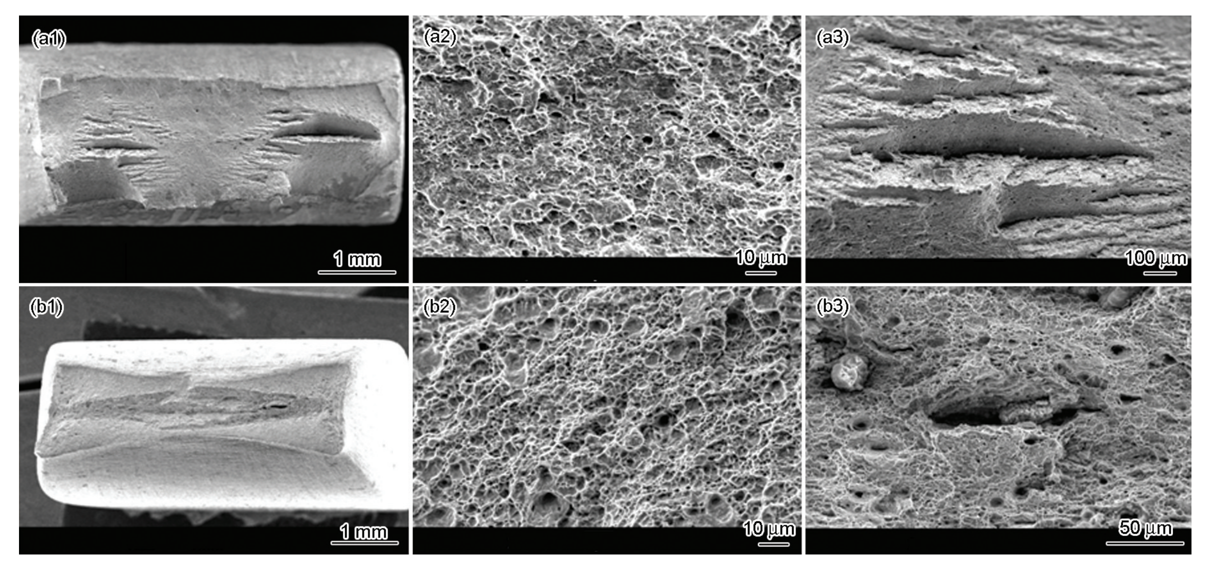


图3 X100管线钢母材在鹰潭无菌与有菌溶液中的断口形貌

Fig.3 SEM images of fracture surfaces of X100 pipeline steel after SSRT in Yingtan solutions without SRB (a1~a3) and with SRB (b1~b3)

与拉伸轴方向大致成45°角，宏观断口均呈现明显的颈缩现象，无菌时的颈缩程度小于有菌时的。由微观形貌图可见，无菌时断口微观形貌均存在少量的韧窝和微孔，同时局部呈现脆性断口特征 (图3a2)，在断口两侧出现大量条纹花样的SCC裂纹 (图3a3)，表明该断口为韧/脆混合断口，说明X100管线钢母材在无菌鹰潭土壤模拟溶液中具有较大的SCC敏感性；有菌时断口形貌以韧窝为主，表现出韧性断口特征 (图3b2)，但在断口右侧存在条纹状的SCC裂纹，但裂纹的周围仍为韧窝形貌 (图3b3)，说明X100管线钢母材在有菌鹰潭土壤模拟溶液中的SCC敏感性小于无菌时的，也就是说SRB的存在导致X100管线钢母材在鹰潭土壤模拟溶液中的SCC敏感性降低。

图4是X100管线钢焊缝在鹰潭无菌与有菌土壤模拟溶液中的SSRT断口的宏观与微观SEM像。从宏观断口可以看出试样断裂面均为斜断口，与拉伸轴方向大致成45°角，有菌时宏观断口颈缩现象明显，无菌时几乎无颈缩现象。由微观形貌图可见，无菌时断口边缘区域微观形貌以扁平的韧窝为主，韧窝间出现明显的撕裂棱，断口中间区域出现准解理断口形貌，呈现出脆性特征，表明该断口为韧/脆混合断口，说明X100管线钢焊缝在无菌鹰潭土壤模拟溶液中具有较大的SCC敏感性；有菌时断口形貌以小韧窝为主，同时伴有少量孔洞，表现出韧性断口特征，说明X100管线钢焊缝在有菌鹰潭土壤模拟溶液中的SCC敏感性较小，且小于无菌时的，也即SRB的存在导致X100管线钢焊缝在鹰潭土壤模拟溶液中的SCC敏感性降低。

应力腐蚀的一个主要特征就是在主裂纹之外，会有二次裂纹的存在，二次裂纹的分布特点通常是形核位置多、数量多、裂纹长短和大小不同。一般认为，如果在腐蚀性介质中拉伸断裂试样断口的侧面存在着微裂纹 (二次裂纹)，则表明该材料对SCC是敏感的。

图5是X100管线钢母材和焊缝在空气中拉伸时的断口侧面形貌。母材和焊缝断口侧面均无二次裂纹出现。图6是X100管线钢母材和焊缝在鹰潭

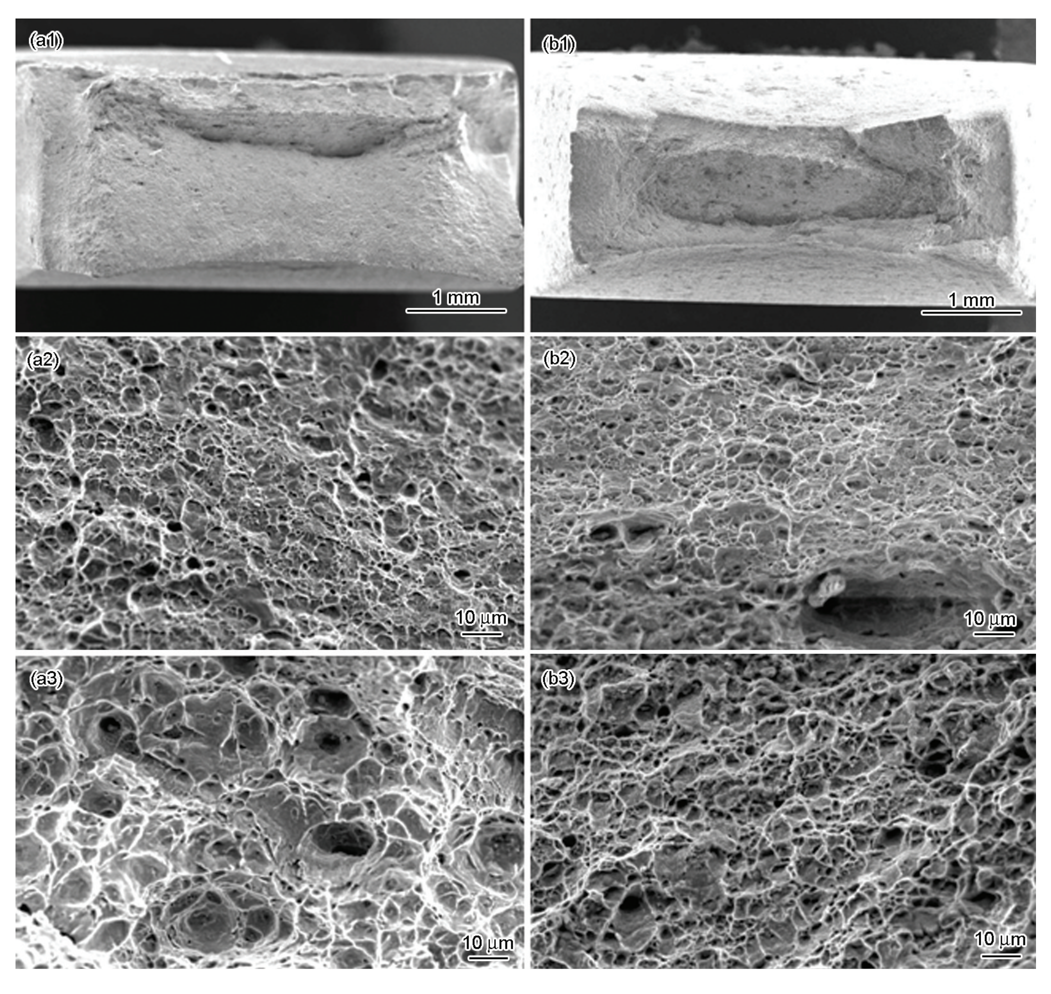


图4 X100管线钢焊缝在鹰潭无菌与有菌溶液中的断口形貌

Fig.4 SEM images of fracture surfaces of X100 pipeline steel weld samples after SSRT in Yingtan solutions without SRB (a1~a3) and with SRB (b1~b3)

模拟溶液中拉伸时的断口侧面形貌，可以看到X100管线钢在无菌与有菌鹰潭土壤模拟溶液中拉伸时，母材和焊缝断口侧面均存在二次裂纹，部分裂纹已经由于扩张而发生合并连续，无菌时二次裂纹的扩展方向与外加应力轴方向呈45°或者垂直，有菌时二次裂纹扩张方向均垂直于外加应力轴方向，由图6a和c可见二次裂纹是沿直线方向扩展的，可以判断出X100管线钢母材和焊缝在无菌的鹰潭土壤模拟溶液中的拉伸断裂属于应力腐蚀穿晶断裂；由图6b和d可见二次裂纹也均是沿直线方向扩展，因此可以判断X100管线钢母材和焊缝在含有SRB的鹰潭土壤模拟溶液中的断裂也属于应力腐蚀穿晶断裂；并且在无菌时二次裂纹密度均高于有菌时的，且二次裂纹无菌时比有菌时深，说明X100管线钢母材和焊缝在鹰潭土壤模拟溶液中拉伸时的SCC敏感性无菌时较有菌时高，进一步证明SRB的存在降低了X100管线钢的SCC敏感性。

以上分析表明：SRB的存在降低了X100管线钢的SCC敏感性，这与人们通常认为的“SRB是微生物中对钢铁腐蚀最为严重的物种”的观点正好相反。Hernandez等[19]的报告中指出，微生物并非总是增强腐蚀的，同一种细菌可能同时具有腐蚀作用和保护作用，假单胞菌就属于这种微生物，而SRB所划分的14个属中就包含脱硫假单胞菌属。通过改

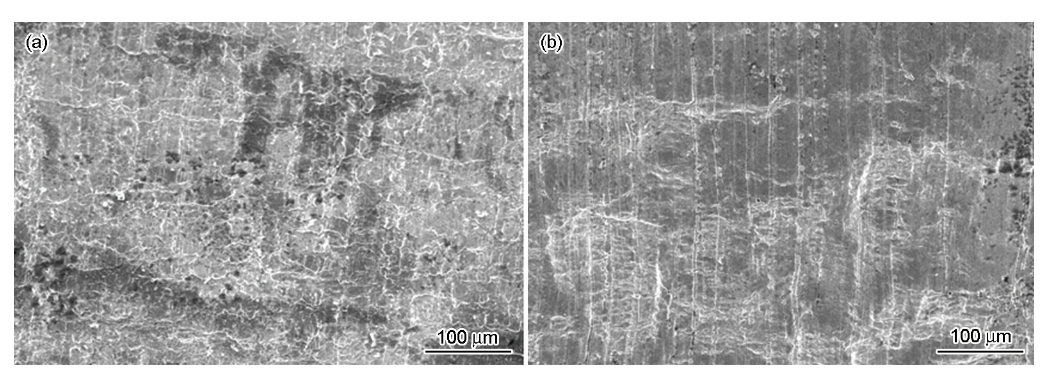


图5 X100管线钢母材与焊缝在空气中SSRT试样断口侧面形貌

Fig.5 SEM images of the side near fracture surfaces of X100 pipeline steel after SSRT in air: (a) base metal; (b) weld metal

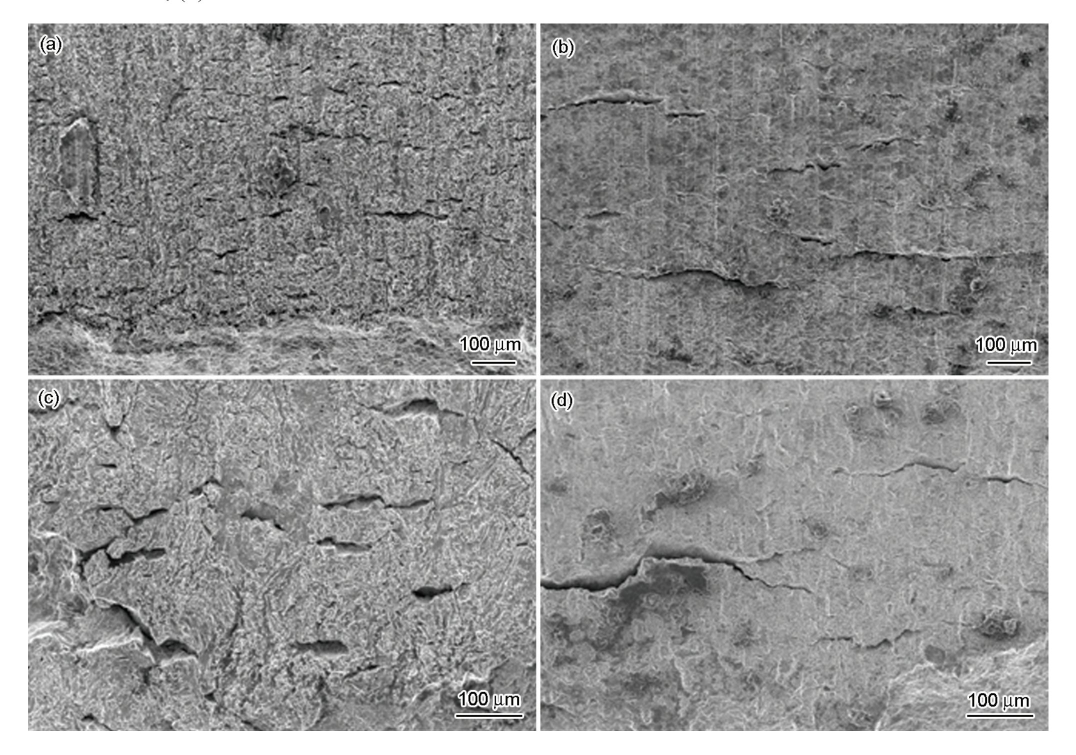


图6 X100管线钢母材和焊缝在鹰潭土壤模拟溶液中无菌与含菌条件下SSRT试样断口侧面形貌

Fig.6 SEM images of the side near fracture surfaces of X100 steel after SSRT in Yingtan soil simulated solutions: (a) base metal in sterile solution; (b) base metal in SRB solution; (c) weld metal in sterile solution; (d) weld metal in SRB solution

变某些条件，完全相同的微生物会呈现保护作用，使腐蚀减慢。Videla[20]全面评价了细菌能够减缓或者抑制腐蚀的各种机理。在这方面，他特别关注了3种主要机理，归纳如下：(1) 中和了环境中存在的腐蚀物质的作用；(2) 在金属上形成保护膜或者稳定了原先存在的保护膜；(3) 导致介质腐蚀性降低。因此，减缓腐蚀可能是上述3种机理之一，或者是这些机理的综合结果。而SRB是一种厌氧菌，它可以在除去O_2的鹰潭土壤模拟溶液中快速生长繁殖并形成生物膜，通过胞外聚合物吸附在X100管线钢的表面，随着SSRT实验时间的增加，该生物膜会不断的在钢表面堆积并变得致密，一定程度上可以阻隔腐蚀性Cl^-进入X100管线钢基体表面，进而降低了X100管线钢的SCC敏感性。

4 结论

(1) X100管线钢焊缝试样在无菌的鹰潭土壤模拟溶液中的应变量、延伸率和断面收缩率均小于其在有菌 (含SRB) 的土壤模拟溶液中的，表明X100管线钢在无菌的鹰潭土壤模拟溶液中SCC敏感性基本上均大于其在含SRB的土壤模拟溶液中的，说明SRB的存在抑制了X100管线钢的脆变，致使X100管线钢的SCC敏感性降低。

(2) X100管线钢母材和焊缝在有菌鹰潭土壤模拟溶液中的SCC敏感性较小，且小于无菌时的，说明SRB的存在降低了X100管线钢母材和焊缝的SCC敏感性。X100管线钢母材和焊缝在无菌和有菌的鹰潭土壤模拟溶液中的断裂形式均属于应力腐蚀穿晶断裂。

(3) SRB降低X100管线钢母材和焊缝SCC敏感性的原因可能是，SRB在除去O_2的鹰潭土壤模拟溶液中能快速繁殖并形成生物膜，该生物膜随时间的增加会不断的堆积并变得致密，一定程度上阻隔了腐蚀性Cl^-进入X100管线钢基体表面，致使X100管线钢的SCC敏感性减小。

参考文献

[1] Zhang C, Cheng Y F. Synergistic effects of hydrogen and stress on corrosion of X100 pipeline steel in a near-neutral pH solution [J]. Mater. Eng. Perform., 2010, 19: 1284

[2] Zhang B, Qian C W, Wang Y M. Development and application of high-grade pipeline steel at home and abroad [J]. Pet. Eng. Constr., 2012, 38(1): 1
(张斌, 钱成文, 王玉梅. 国内外高钢级管线钢的发展及应用 [J]. 石油工程建设, 2012, 38(1): 1)

[3] Argonne National Laboratory. Environmentally acceptable methods control pipeline corrosion at lower cost [J]. Mater. Perform., 1997, 36(2): 71

[4] Peabody A W. Pipeline Corrosion Control [M]. 2nd Ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2004
(皮博迪 A W. 管线腐蚀控制 [M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2004)

[5] Wu T Q, Xu J, Sun C. Microbiological corrosion of pipeline steel under yield stress in soil environment [J]. Corros. Sci., 2014, 88: 291

[6] Cote C, Rosas O, Sztyler M. Corrosion of low carbon steel by microorganisms from the 'pigging' operation debris in water injection pipelines [J]. Bioelectrochemistry, 2014, 97: 97

[7] Chen X, Wang G F, Gao F J. Effects of sulphate-reducing bacteria on crevice corrosion in X70 pipeline steel under disbonded coatings [J]. Corros. Sci., 2015, 101: 1

[8] Fang B Y, Atrens A, Wang J Q. Review of stress corrosion cracking of pipeline steels in "low" and "high" pH solutions [J]. J. Mater. Sci., 2003, 38: 127

[9] Marchal R, Chaussepied B, Warzywoda M. Effect of ferrous ion availability on growth of a corroding SRB [J]. Int. Biodeterior. Biodegrad., 2001, 47: 125

[10] Bouaeshi W, Ironside S, Eadie R. Research and cracking implications from an assessment of two variants of near-neutral pH crack colonies in liquid pipelines [J]. Corrosion, 2007, 63: 648

[11] Park J J, Pyun S I, Kho K H Na. Effect of passivity of the oxide film on low-pH stress corrosion cracking of API 5L X-65 pipeline steel in bicarbonate solution [J]. Corrosion, 2002, 58: 329

[12] Javaherdashtia R, Raman R K S, Panter C, et al. Microbiologically assisted stress corrosion cracking of carbon steel in mixed and pure cultures of sulfate reducing bacteria [J]. Int. Biodeterior. Biodegrad., 2006, 58: 27

[13] Eslami A, Fang B, Kania R. Stress corrosion cracking initiation under the disbonded coating of pipeline steel in near-neutral pH environment [J]. Corros. Sci., 2010, 52: 3750

[14] Abedi S Sh, Abdolmaleki A, Adibi N. Failure analysis of SCC and SRB induced cracking of a transmission oil products pipeline [J]. Eng. Fail. Anal., 2007, 14: 250

[15] Biezma M V. The role of hydrogen in microbiologically influenced corrosion and stress corrosion cracking [J]. Int. J. Hydrog. Energy, 2001, 26: 515

[16] Wu T Q, Yan M C, Zeng D C. Stress corrosion cracking of X80 steel in the presence of sulfate-reducing bacteria [J]. J. Mater. Sci. Technol., 2015, 31(4): 413

[17] Li X G, Du C W, Dong C F. Corrosion Behavior and Experimental Research of X70 Steel [M]. Beijing: Science Press, 2006
(李晓刚, 杜翠微, 董超芳. X70钢的腐蚀行为与试验研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2006)

[18] Shu D L, Feng Y, Chen J B. Engineering Materials Mechanical Performance [M]. Beijing: Machine Industry Press, 2005
(束德林, 凤仪, 陈九磅. 工程材料力学性能 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005)

[19] Hernandez G, Kucern V, Thierry D, et al. Corrosion inhibition of steel by bacteria [J]. Corrosion, 1994, 50(8): 603

[20] Videla H A. Mechanisms of MIC: Yesterday, today and tomorrow [C]. MIC-An International Perspective Symposium, Extrin Corrosion Consultants [A]. Perth, 2007

